



COMPÓSITOS POLIMÉRICOS INSPIRADOS NA ORGANIZAÇÃO HIERÁRQUICA DAS MICROFIBRAS DE CELULOSE DAS ÁRVORES

Râmile Luíse Pereira Oliveira Moreira, rami_lui@hotmail.com^{1,2}
Mathias Strauss, mathias.strauss@lnnano.cnpem.br¹

¹Laboratório Nacional de Nanotecnologia, Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, Campinas – SP – BR

²Universidade Estadual de Santa Cruz, endereço para correspondência, Ilhéus – BA – BR

Resumo. *É importante produzir compósitos que se controle a organização das fibras de celulose para alcançar melhores propriedades mecânicas, ou produzir materiais com anisotropias estruturais relevantes que resultam em materiais com potencial para substituir ligas metálicas e outros materiais estruturais. O principal objetivo deste trabalho foi avaliar como a variação dos ângulos juntamente com a organização hierárquica das fibras de celulose da madeira influenciam nas propriedades mecânicas em compósitos poliméricos. Para isso foi necessário i) cortar placas de madeira com as fibras em diferentes alinhamentos, ii) delignificação dos corpos de prova para remoção de lignina e hemicelulose, iii) impregnação com solução contendo polímero e iv) prensagem a quente para densificação dos compósitos. As amostras que apresentaram melhores resultados mecânicos foram aquelas que não haviam variações nos ângulos das fibras com o sentido de crescimento da planta.*

Palavras chave: *Compósitos poliméricos. Madeira. Fibras naturais. Resistência mecânica*

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade a madeira é utilizada de diversas maneiras, seja para obtenção de fogo, bem como para uso estrutural, para construir moradias e templos, por exemplo. No Brasil moderno, o cultivo da madeira, destina-se principalmente a indústria de papel e celulose como também para produzir móveis e estruturas de grande e pequeno porte. Aliado a isso, várias tecnologias são empregadas na madeira com objetivo de melhorar as suas propriedades mecânicas, térmicas, de resistência química, entre outras.

A organização microestrutural hierárquica, aliado com a composição química da madeira, fatores que variam a partir de espécie, idade, tamanho e localização na árvore, são responsáveis por garantir à planta propriedades de resistência mecânica e química, de condução de seiva e fluídos, e armazenamento de nutrientes e energia. A composição química majoritária da madeira é de celulose e hemicelulose, que são polissacarídeos, e lignina que é um polifenólico amorfo. Há estudos que comprovam que as quantidades de lignina e hemicelulose interferem diretamente nas propriedades mecânicas desses materiais.

Quando uma amostra de qualquer espécie de madeira é observada em diferentes escalas, desde a macro até a nano escala, é possível perceber que sua estrutura é organizada de maneira hierárquica composta por macro, micro e nano fibras de celulose. A madeira cresce por meio de uma auto-montagem *bottom-up* biologicamente controlada, e todos os níveis estruturais contribuem para as propriedades notáveis da madeira. (Weinkamer, et al. 2011) (Vay, et al. 2015) (Cabane, et al. 2016)

Outra característica determinante nas propriedades mecânicas da madeira é o ângulo de organização das microfibras em relação ao sentido de crescimento da planta. Nas árvores, fibras de celulose estão organizadas em ângulos distintos de acordo com a demanda mecânica necessária, ou seja, o ângulo de organização das fibras e microfibras com relação ao sentido de crescimento da planta está diretamente ligada com propriedades mecânicas como flexibilidade e resistência a compressão por peso. De modo que na própria árvore são encontradas microfibras em diferentes ângulos que melhor atendem as propriedades mecânicas para a respectiva estrutura.

A compreensão da estrutura da madeira de forma mais profunda, tem permitido o desenvolvimento de muitos materiais avançados inspirados nela. Recentemente, vários materiais compósitos derivados da madeira com desempenhos surpreendentes foram fabricados modificando a microestrutura das madeiras naturais, como a incrível “super madeira” mais resistente que ligas metálicas ou combinação da celulose derivada da madeira com materiais sintéticos. Esses materiais apresentam potencial para serem utilizados como elementos estruturais em aeronaves, carros e móveis, por exemplo. (Chen, et al. 2018) (Xiong, et al. 2018)

No âmbito do desenvolvimento de tecnologias verdes a madeira parece ser uma boa opção para o desenvolvimento de materiais avançados, uma vez que seus processos produtivos já são consolidados, bem como é uma alternativa sustentável. A vantagem de produzir compósitos contendo a madeira como matriz é o fato desse material ser renovável, biodegradável,

abundante e possuir excelente tenacidade entre outros. Entretanto, ainda é um desafio superar as desvantagens da madeira como inflamabilidade e baixa resistência à corrosão.

Observa-se que é cada vez mais comum o uso de compósitos de matriz polimérica contendo fibras naturais por conta do interesse de desenvolver materiais com apelo verde (Song, et al. 2018). Um dos tipos de fibras que tem se estudado são as fibras de celulose, no entanto métodos de processamento mais comuns levam a compósitos em que as fibras estão distribuídas aleatoriamente e por isto possuem propriedades mecânicas isotrópicas, diferente do que ocorre na madeira. Por conta disto, neste projeto estudou-se a influência da organização hierárquica das fibras de celulose presentes na madeira nas propriedades estruturais e mecânicas de compósitos poliméricos nos quais os ângulos de alinhamento das fibras são distintos levando a compósitos com propriedades mecânicas anisotrópicas.

2. Metodologia Experimental

Compósitos poliméricos contendo fibras de celulose com diferentes ângulos foram obtidos por processos consecutivos de i) corte de placas de madeira para definição dos ângulos de alinhamento das fibras nos corpos de prova, ii) delignificação dos corpos de prova para remoção de lignina e hemicelulose, iii) impregnação com solução contendo polímero e posterior eliminação do solvente, e iv) prensagem a quente para densificação dos compósitos, descritos detalhadamente nas seções a seguir.

2.1 Obtenção dos corpos de prova e ensaio mecânico

Corpos de prova retangulares de madeira balsa foram cortados em dimensões de 50x10 mm a partir de placas com 1,5 mm de espessura com o auxílio de um bisturi cirúrgico. Nessa etapa foram definidos os ângulos das fibras da madeira com relação ao sentido de comprimento dos corpos de prova (0, 15, 30, 45 ou 60°). Em seguida, o comprimento, largura e espessura bem como a massa dos corpos de prova foram medidos individualmente (N = 15) com auxílio de um paquímetro e uma balança analítica, para calcular os valores da densidade e posteriormente comparar as propriedades dimensionais dos corpos de prova após cada etapa de obtenção dos compósitos.

A delignificação, que consiste basicamente na remoção parcial da lignina e hemicelulose da madeira natural, foi realizada em solução aquosa de hidróxido de sódio e de sulfito de sódio em ebulição, seguida por um branqueamento com peróxido de hidrogênio. Foram utilizados 10 mL de solução por corpo de prova ($m \sim 0,08$ g), e concentrações de 2,5 e 0,4 mol/L de hidróxido de sódio e de sulfito de sódio, respectivamente. O sistema foi mantido em ebulição e agitação magnética branda por 5 h. Os corpos de prova foram lavados três vezes com água destilada quente. Em seguida, o branqueamento dos corpos de prova foi realizado em solução de peróxido de hidrogênio 2,5 mol/L em pH ~ 9 em ebulição por 2 h. Os corpos de prova delignificados e branqueados foram lavados 3x com água destilada e imediatamente congelados num freezer por pelo menos 24 h.

Os corpos de prova congelados foram liofilizados, que é um processo de desidratação em que o gelo presente no produto é removido por sublimação. A liofilização foi realizada em um equipamento da Enterprise II Terroni por 24 h. Os corpos de prova delignificados e liofilizados foram novamente dimensionados quanto ao comprimento, largura, espessura e massa.

O polímero utilizado na etapa de impregnação foi o polietileno, enquanto que o solvente impregado foi o xileno. Primeiramente o polietileno foi solubilizado em xileno nas concentrações de 25, 50 e 75 g/L a aproximadamente 90 °C em sistema de refluxo composto por um balão de fundo redondo equipado com condensador de bolas. Após completa solubilização do polímero, adicionou-se os corpos de prova delignificados (1 corpo de prova para cada 10 mL de solução de polímero) e deixou-se por 1,5 h sob agitação magnética branda. Os corpos de prova impregnados foram removidos e o solvente deixado evaporar por 24 h em capela. Os corpos de prova resultantes foram dimensionados quanto ao comprimento, largura, espessura e massa.

Posteriormente, foi realizada uma prensagem a quente dos corpos de prova impregnados para que os mesmos pudessem ser densificados e o polímero homogenizado na estrutura. Para isto, os corpos de prova foram previamente aquecidos em estufa a 120°C por 20 min para permitir a fusão do polímero, em seguida prensados em uma prensa aquecida, MH equipamentos LTDA, modelo PR8HP, a 120°C com 5 toneladas de pressão por 5 min. Os corpos de prova prensados foram resfriados a temperatura ambiente e então novamente dimensionados quanto ao comprimento, largura, espessura e massa.

Ensaio mecânicos de tração e flexão foram realizado em uma máquina universal de ensaios EMIC modelo DL2000, NO 12101 e NS 808. Para o ensaio de tração foi utilizado uma célula de carga de 500 N, uma velocidade de ensaio de 5 mm/min e comprimento útil entre garras de 10 mm, foi utilizado também o sistema de garras adequado para filmes, uma vez que as amostras possuíam espessura bastante baixa. Para o ensaio de flexão, a célula de carga utilizada foi de 5 N, com uma velocidade de ensaio também de 5 mm/min, e distância entre apoios de 40 mm.

3. Resultados e discussões

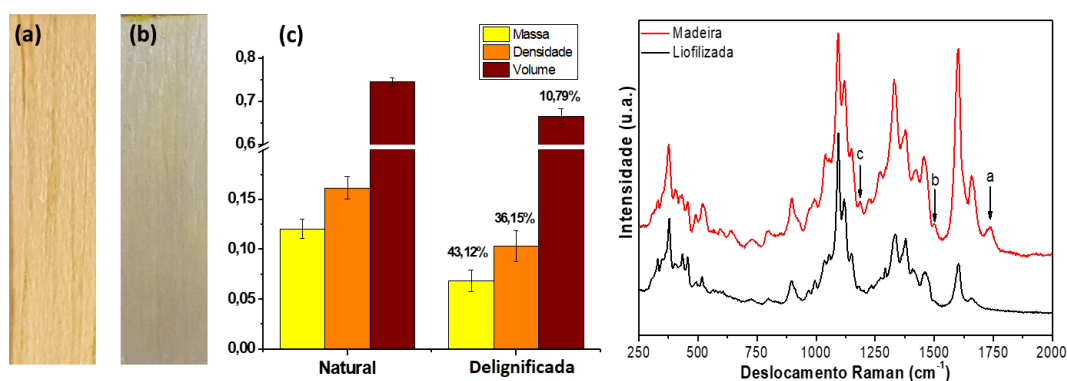
As duas primeiras etapas de confecção dos compósitos consistiu, basicamente, no corte dos corpos de prova com alinhamento das fibras da madeira no sentido do comprimento dos mesmos em ângulos de 0, 15, 30, 45 e 60°, seguida

pela retirada parcial de lignina e hemicelulose. Durante o próprio processo foi possível analisar, visualmente a distinção entre os corpos de prova delignificados e os naturais, no qual a principal diferença foi a coloração, cujo corpos delignificados apresentaram coloração mais clara e esbranquiçada, do que a madeira balsa natural (Fig. 1a e b), indicativo da remoção de lignina. Nota-se visualmente que o alinhamento das fibras da madeira é mantido nos materiais delignificados (Fig. 1a e b).

A Fig. 1c mostra que a massa apresentou uma perda bastante considerável de 43,12%, e a densidade apresentou redução de 36,15% devido ao processo de delignificação, sem perda significativa de volume. Isso fortalece os indícios que o processo de delignificação conseguiu retirar parcialmente a hemicelulose e lignina da estrutura da madeira, sem alterações macroestruturais ou dimensionais volumétricas relevantes, mantendo a macroestrutura das fibras de celulose intacta para adição do polímero.

Os espectros Raman apresentados na Fig. 1d, evidenciam a remoção da lignina da estrutura da madeira. No espectro da madeira verifica-se a presença dos picos indicados com as letras a, b e c, que correspondem a bandas características de lignina na amostra de madeira natural. Quando é observado o espectro da madeira liofilizada nota-se que esses picos desaparecem, o que confirma a retirada de lignina e hemicelulose pelo processo de delignificação.

Figura 1. Resultados do processo de delignificação. Foto da a) madeira balsa natural e b) madeira balsa delignificada. c) Gráfico de massa, densidade e volume comparativa entre os corpos de prova madeira natural e a delignificada. d) Espectros Raman da madeira natural e liofilizada. Fonte: Próprio autor.



A madeira apresenta uma organização presente em várias escalas de observação a partir disso foram utilizadas diferentes técnicas de caracterização capazes de acessar informações em diferentes escalas para avaliar essa organização na madeira. Com este objetivo foram utilizadas a microtomografia de raios-X, microscopias confocal a laser, eletrônica de varredura (MEV) e de varredura por sondas (AFM). As imagens referentes a cada uma das microscopias ditas anteriormente encontram-se na Fig. 2. Na análise da madeira natural, por microscopia confocal a laser (Fig. 2a, c), observa-se a presença das fibras no sentido de crescimento da planta e rugosidade média quadrática (R_q) de 22,99 μm , em vista disso percebe-se que a microestrutura da madeira de trabalho é bastante organizada e rugosa.

A análise da amostra delignificada (Fig. 2b, d) evidencia que mesmo após o processo a retirada de lignina e hemicelulose a organização das fibras majoritariamente se mantém. Outra observação bastante relevante é que a amostra delignificada apresenta valores maiores de rugosidade (R_q), de 34,03 μm , se comparada a madeira natural, confirmando a remoção de lignina da estrutura. A rugosidade acentuada da madeira delignificada pode ser útil para adição do polímero na etapa de impregnação.

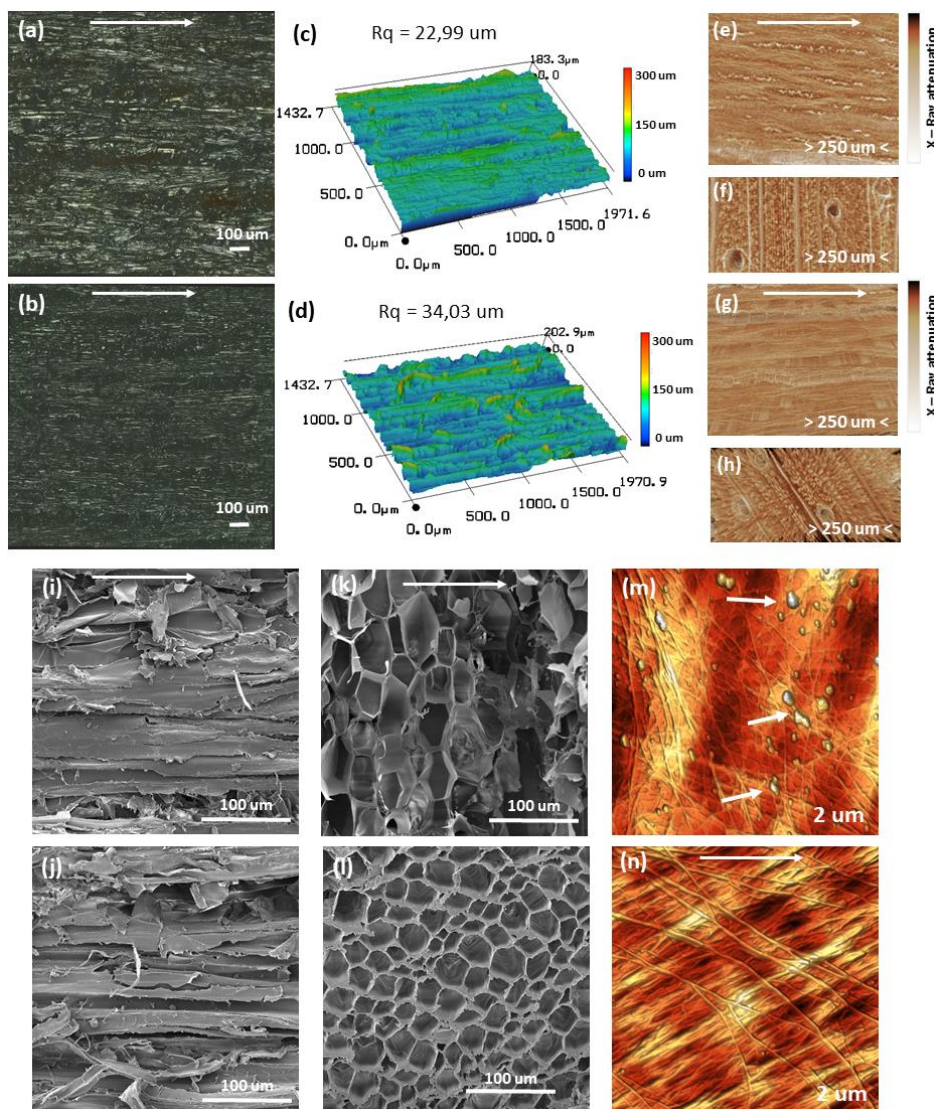
As imagens de microtomografia de raios X (Fig. 2e, h) mostram a presença de macroporos condutores ao longo da estrutura fibrosa da madeira, por onde passam seiva e água, e que os mesmos ficam intactos com o processo de retirada de lignina e hemicelulose. Ficam evidentes também as estruturas fibrilares da madeira natural e delignificada com fibras alinhadas ao longo do sentido de crescimento da planta. É relevante notar que maiores atenuações de raios-X são observadas para a madeira natural, indicando a remoção da lignina de estruturas mais densas no processo de delignificação.

Nas imagens de microscopia eletrônica de varredura (Fig. 2j, l), verifica-se de fato a retirada de lignina pelo processo de delignificação mas que independente disto as fibras permanecem bem orientadas, e no mesmo sentido de orientação da madeira natural. As imagens dos cortes transversais evidenciam a estrutura celular da madeira natural que é mantida intacta após a delignificação. A estrutura de alta porosidade pode ser útil na etapa de impregnação do polímero, e possivelmente será colapsada na etapa de prensagem e densificação.

A microscopia de força atômica (AFM), foi utilizada para observar a organização das nanofibras presentes na madeira natural e delignificada. Na madeira natural são observadas estruturas globulares (indicadas por setas) atribuídas a lignina além das estruturas das nanofibras de celulose com organização aleatória. Após o processo de delignificação nota-se significativa redução na quantidade de estruturas globulares de lignina. Além disto, as estruturas nanofibrilares de celulose ficam mais evidentes devido a remoção da lignina.

Portanto, a partir da análise de várias técnicas de caracterização e microscopia foi possível provar que a madeira possui, de fato, organização em diferentes escalas, desde as suas nanofibras até as macrofibras, sendo a madeira, portanto considerada uma organização hierárquica. Aliado a isso, mesmo após o processo de retirada de lignina e hemicelulose os materiais resultantes mantêm a organização inicial das fibras de celulose.

Figura 2. a), c) Microscopia confocal da madeira balsa. b), d) confocal madeira delignificada. e), f) Microtomografias de raios-X da madeira balsa. g), h) Microtomografias de raios-X da madeira delignificada. i), j), k), l) MEV da madeira balsa e delignificada. m), n) AFM madeira e delignificada. Fonte: Próprio autor.



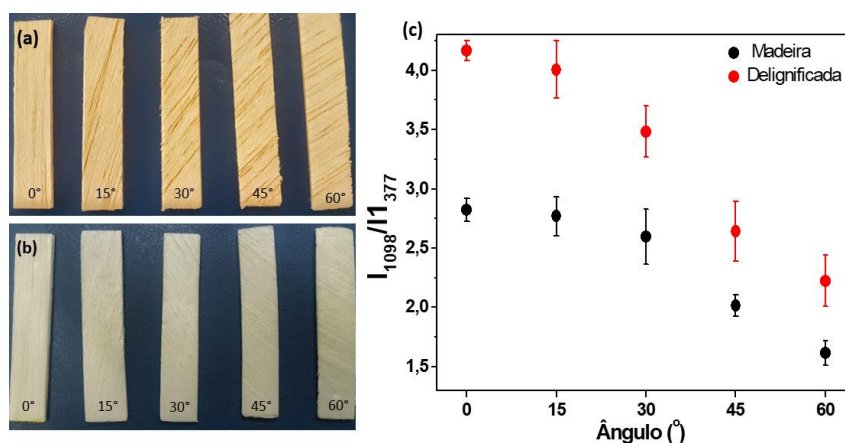
Um fator que altera diretamente algumas propriedades das árvores, sobretudo as propriedades mecânicas é como suas microfibras estão organizadas de acordo com o sentido de crescimento da planta, principalmente nas paredes secundárias das células vegetais (S2). Baseando-se nisso, este trabalho produziu corpos de prova com cinco ângulos de fibra (0, 15, 30 45 e 60°) com relação ao comprimento. Para avaliar como ocorre a variação das propriedades mecânicas em função do ângulo das fibras nos compósitos.

As Fig. 3a e b mostram imagens dos corpos de prova de madeira natural e delignificada respectivamente, que foram cortados com sentidos de organização de fibras distintos (ângulos de 0° a 60° da esquerda para a direita, variando 15° entre cada corpo de prova). Fica visível nestas imagens a forma como as fibras estão distribuídas nos corpos de prova, e que esta organização não é perdida na delignificação

É conhecido que se as microfibrilas possuem alguma orientação preferencial algumas bandas da celulose têm a sua intensidade afetada pela direção de polarização do laser. Por isto, os corpos de prova com fibras em diferentes ângulos foram analisados por microscopia Raman com objetivo de avaliar se a organização das microfibras segue a variação dos ângulos das fibras.

A Fig. 3c mostra a dependência do ângulo das fibras da madeira e madeira delignificada com a razão de intensidade das bandas 1098 ($\nu(\text{COC})_{\text{ass}}$, anel glicosídico, sensível a orientação) e 1377 cm^{-1} ($\delta(\text{CH}_2)$, insensível a orientação) de espectros Raman com laser polarizado. Verifica-se que quando aumenta o valor do ângulo da fibra, menor é o valor de intensidade na banda em 1098 cm^{-1} , que é sensível a excitação por laser polarizado, indicando que as microfibras possuem um arranjo preferencial nos corpos de prova. O decaimento do valor da banda a partir do aumento da inclinação das fibras é mais significativo para a madeira delignificada porque essa amostra apresenta quantidades menores de lignina e hemicelulose e conseqüentemente é mais fácil perceber a diminuição de intensidade das bandas de celulose com a variação do ângulo das fibras.

Figura 3. Estudo sobre os ângulos das fibras de madeira. a), b) Corpos de prova de madeira natural e delignificados, respectivamente, cortados com fibras orientadas em ângulos de 0, 15, 30, 45 e 60°. c) Gráfico da dependência do ângulo da fibra com a razão de intensidade das bandas em 1098 e 1377 cm^{-1} . Fonte: Próprio autor.

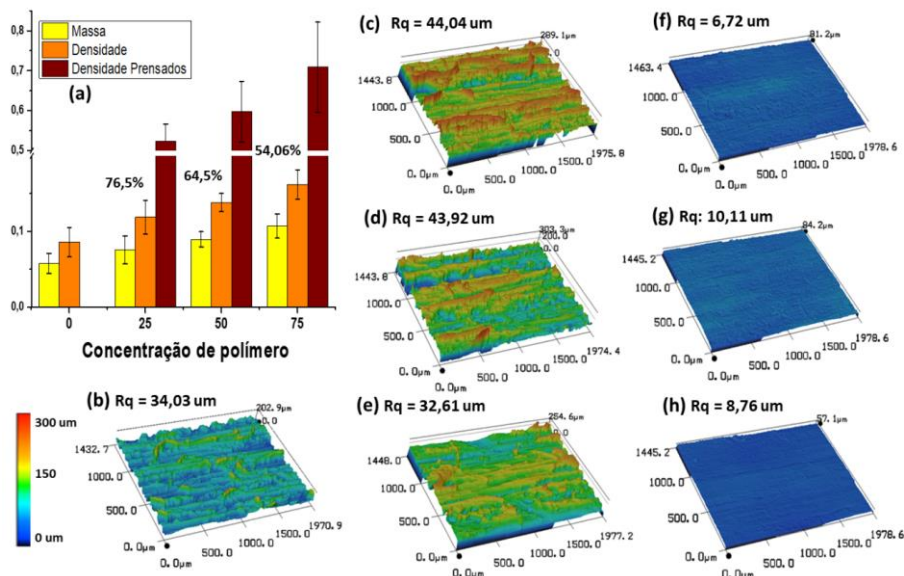


Para formação do compósito polimérico, as amostras foram impregnadas com polietileno, utilizando soluções poliméricas nas concentrações de 25, 50 e 75 g/L de polietileno em xileno. Nota-se que houve um aumento linear da massa e conseqüentemente da densidade das amostras em função do aumento da concentração de polímero, esse comportamento pode ser observado na Fig. 4a. Tanto o aumento da massa quanto da densidade com o aumento da concentração de polímero, indica que polímero é adicionado a estrutura fibrilar da madeira delignificada e que é possível controlar os teores de polímero nos corpos de prova finais. Além disso, o teor de fibras diminui à medida que aumenta a concentração de polímero, de modo que em 25g/L o teor de fibras é 76,5%, enquanto que na concentração de 75g/L a porcentagem de fibras encontra-se em torno de 54,1%.

Outrossim, a análise das imagens de microscopia confocal a laser da Fig. 4, no qual há uma comparação de altura, entre a madeira delignificada e os corpos de prova impregnados e prensados com as três concentrações. Verifica-se a rugosidade dos corpos de prova na madeira impregnada é bastante significativa, principalmente nas amostras com maior concentração de polímero. Isso ocorre devido à dificuldade do polietileno solubilizar com o solvente, principalmente em maiores quantidades de polímero, o que leva ao recobrimento mais irregular das fibras. No entanto, nota-se que mesmo após o processo de impregnação a estrutura fibrilar dos corpos de prova é mantida.

As imagens da Fig. 4f-h referem-se às amostras com as diferentes concentrações de polímero que passaram pelo processo de prensagem a quente. Esses compósitos apresentam redução da rugosidade e uma superfície mais homogênea que as amostras impregnadas indicando a densificação da estrutura e homogeneização do polímero ao longo do compósito.

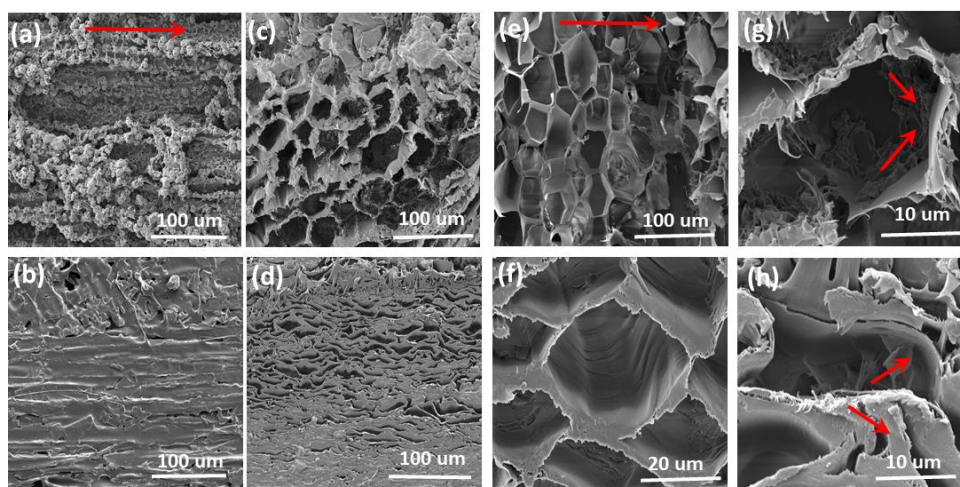
Figura 4. a) Massa e densidade dos corpos de prova em função da concentração de polietileno em solução. Imagens de altura por microscopia confocal da b) madeira delignificada. e dos compósitos com c) 25, d) 50, e e) 75 g/L de polietileno. Compósitos prensados com f) 25, g) 50, h) 75 g/L de polímero. Fonte: Próprio autor.



Outra informação importante é que a medida que aumenta a concentração de polietileno na amostra é possível notar a formação de estruturas globulares de polímeros distribuídas ao longo da superfície do corpo de prova impregnado, tal qual exemplificado na Fig. 5a. Isso torna-se mais evidente para as concentrações maiores, ou seja 50 e 75 g/L. A justificativa para esse evento está no fato do polietileno não conseguir solubilizar muito bem xileno, com isto a remoção do solvente por evaporação leva a formação destas estruturas. Após o processo de prensagem a quente continua possível a observação da estrutura fibrilar (Fig. 5b) no entanto o polímero encontra-se bem distribuído e homogêneo na superfície, não é mais possível visualizar as estruturas globulares de polímero.

Utilizando a microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível verificar a presença de polímero dentro da estrutura celular dos materiais impregnados. A Fig. 5e-h apresenta uma comparação entre o poro da madeira, desde a madeira natural, delignificada, impregnada e prensada, respectivamente, nos locais onde estão setas indicando mostram a deposição de polímero nos poros. Além disto a prensagem a quente promoveu a densificação e colapso quase total da estrutura celular da madeira delignificada, como pode ser visto na Fig. 5d. Nota-se também que o processo de fusão do polímero leva a formação de pontes de polímero nas estruturas celulares da madeira agindo como aderente entre as superfícies, que pode atuar positivamente nas propriedades mecânicas destes materiais.

Figura 5. Imagens obtidas pelo MEV a), c) madeira impregnada 75g/L. b), d) madeira prensada a quente 75g/L. k) poro da madeira natural l) Poro da madeira delignificada m) poro da madeira impregnada com polímero. f) poro da madeira prensada a quente. Fonte: Próprio autor.



Ensaio de tração e flexão dos compósitos com os 5 ângulos das fibras nas 3 diferentes concentrações de polímero foram realizadas para avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos. Nesses ensaios foram coletados dados referentes a tensão e resistência na flexão, ambos em Mpa, para os ensaios de tração e flexão, respectivamente e o módulo de elasticidade em Mpa. Nas Fig. 6 e 7 encontram-se os gráficos da variação da tensão ou resistência na flexão e módulo de elasticidade em função do ângulo das fibras para o ensaio de tração e flexão respectivamente.

Em primeiro plano, a partir da análise dos quatro gráficos contidos nas Fig. 6 e 7 pode-se afirmar que tanto a tensão, quanto o módulo de elasticidade aumentam a medida que o ângulo das fibras diminuem, ou seja, os valores de tensão e módulo tendem a ser maiores quando não há variação do ângulo das fibras nos compósitos tal qual ocorre nas árvores. Mostrando que é possível utilizar da estrutura hierárquica da madeira para produzir compósitos poliméricos com anisotropia das propriedades mecânicas.

Isso ocorre porque, para ângulos maiores (30-60°), a fratura nos ensaios de tração ocorre ao longo das fibras, sem rompimento das fibras propriamente ditas. Como as forças de coesão entre as fibras (interfibras) são mais fracas que as forças das ligações químicas nas fibras (intrafibras) isto acarreta em menores resistência as solicitações de tração e flexão. Conforme o ângulo diminui aumenta a interface da fratura interfibras e, portanto, os valores de força e módulo aumentam. Já para ângulos menores (0 e 15°) a fratura ocorre de modo perpendicular à direção da fibra, ou seja, para conseguir fraturar esses corpos de prova promover a quebra das fibras, e esse rompimento de fibras envolve quebra de ligações covalentes fortes, por conta disso é fundamental que seja exercido uma força maior para ocorrer a falha.

Neste estudo a variação na concentração de polímero não apresentou influência no aumento ou diminuição da força máxima e do módulo de elasticidade, uma vez que não é possível perceber uma tendência nos gráficos apresentados, levando em conta a variação da concentração de polímero. O que evidencia o papel principal das fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos obtidos.

Figura 6. a) Valores de tensão e b) Módulo de elasticidade em função dos ângulos das fibras dos compósitos no ensaio de tração. Fonte: Próprio autor.

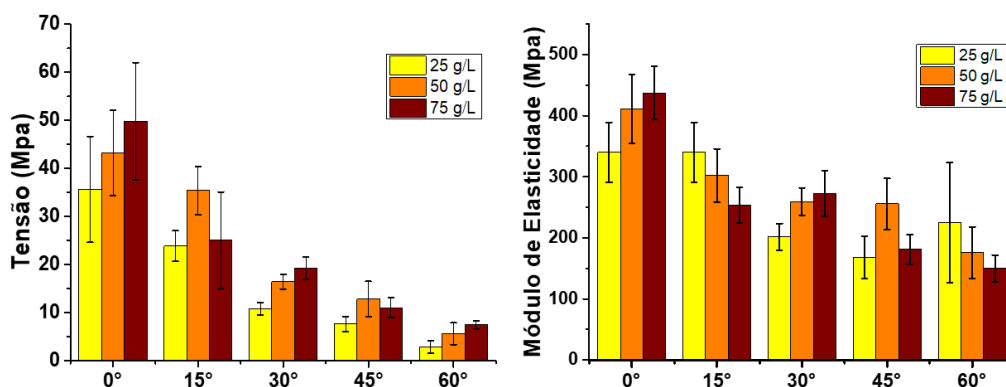
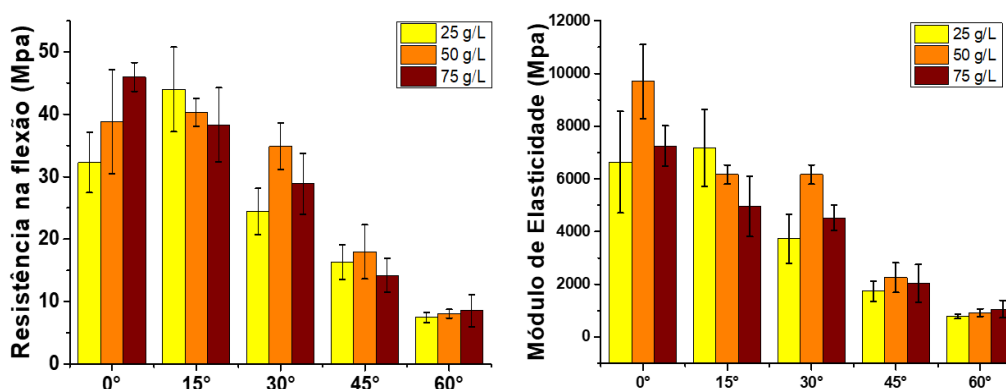


Figura 7. a) Valores de resistência na flexão e b) Módulo de elasticidade em função dos ângulos das fibras dos compósitos no ensaio de flexão. Fonte: Próprio autor.



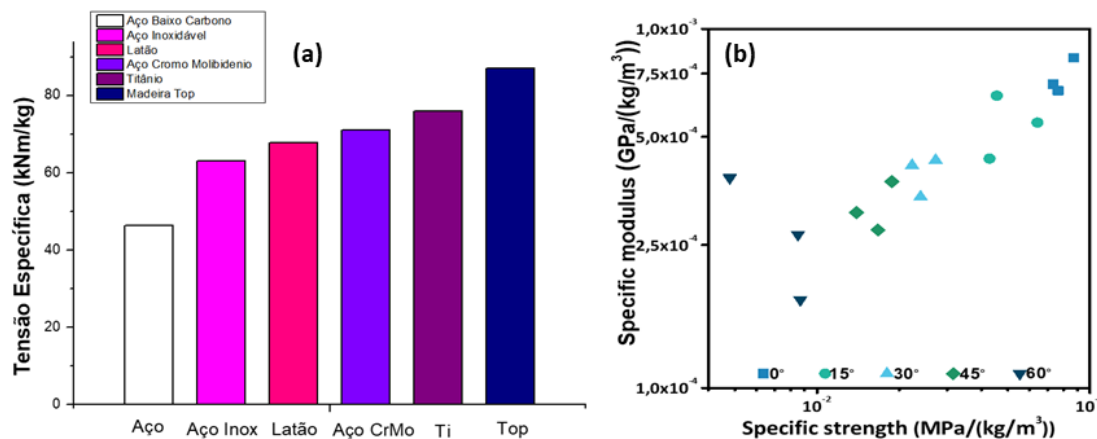
A fim de comparar o desempenho mecânico dos materiais produzidos com outros materiais estruturais calculou-se a tensão específica para o ensaio de tração. Este valor consiste na razão entre a tensão (Mpa) e a densidade do material, a partir disso foi obtido uma tensão específica de 87 kNm/kg, para amostra com ângulos de fibras de 0° e concentração de 50g/L de polietileno.

A tensão específica para o compósito produzido neste trabalho é maior do que a tensão específica de alguns materiais metálicos como Aço inoxidável, Latão, Aço cromo molibdênio, titânio, entre outros (Fig. 8a). A partir disso, com estudos mais avançados dos compósitos produzidos, sem perda nenhuma, pode emprega-los na substituição de alguns desses elementos metálicos em componentes estruturais.

Também foi calculado o valor de Módulo específico, que consiste na razão entre o módulo elástico (Mpa) e a densidade do material, para todas as amostras submetidas a ensaio de tração. O gráfico comparativo dos valores de modulo específico

por tensão específica encontra-se na Fig. 8b, no qual verifica-se que a razão é maior para as amostras sem variação no ângulo das fibras, 0°.

Figura 8: a) Comparação da tensão específica dos materiais. b) gráfico de módulo específico por tensão específica. Fonte: Próprio autor.



4. Conclusão

A estrutura hierárquica da madeira é mantida em todos os processos realizados para obtenção do compósito polimérico, delignificação, impregnação e prensagem a quente, isso é basilar para obter o compósito que apresentasse fibras organizadas.

Verificou-se que há relação entre a propriedade mecânica e ângulo de organização das fibras da madeira nos compósitos poliméricos hierárquicos produzidos. Os materiais com menores ângulos das fibras com relação ao sentido de comprimento dos corpos de prova, e tal qual o sentido de crescimento das árvores, apresentaram os melhores desempenhos mecânicos, tanto de força máxima quanto de módulo de elasticidade para ambas solicitações realizadas nesse processo.

Aliado a isso, a quantidade de polímero no compósito não interferiu nos resultados da propriedade mecânica. Por fim, o compósito polimérico inspirado na organização hierárquica das árvores apresenta melhor desempenho de módulo elástico específico do que algumas ligas metálicas.

5. Agradecimentos

Agradeço ao CNPEM, na pessoa de Mathias Strauss por possibilitar o desenvolvimento e execução desse trabalho. Agradeço ao comitê Gestor do 28º Programa Bolsas de Verão, bem como ao pessoal do LNNano pelas imagens de microscopia. Agradeço aos meus professores, em especial aos do curso de Engenharia Mecânica da UESC.

6. REFERÊNCIAS

- VAY, Oliver et al. "Thermal conductivity of wood at angles to the principal anatomical directions." Wood science and technology, v. 49, n. 3, p. 577-589, 2015.
- WEINKAMER, Richard; FRATZL, Peter. "Mechanical adaptation of biological materials"—The examples of bone and wood. Materials Science and Engineering: C, v. 31, n. 6, p. 1164-1173, 2011.
- CABANE, Etienne et al. "Functional lignocellulosic materials prepared by ATRP from a wood scaffold." Scientific reports, v. 6, p. 31287, 2016.
- SONG, Jianwei et al. "Processing bulk natural wood into a high-performance structural material." Nature, v. 554, n. 7691, p. 224, 2018.
- CHEN, Chaoji et al. "Scalable and sustainable approach toward highly compressible, anisotropic, lamellar carbon sponge". Chem, v. 4, n. 3, p. 544-554, 2018.
- XIONG, Rui et al. "Naturally-derived biopolymer nanocomposites: Interfacial design, properties and emerging applications." Materials Science and Engineering: R: Reports, v. 125, p. 1-41, 2018.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.